

## Теоретичний аналіз ефективності додаткового поверхневого обробітку ґрунту зубовими боронами в складі комбінованого знаряддя

В роботі представлений зміст та результати теоретичного аналізу ефективності процесу додаткового поверхневого обробітку ґрунту зубовими боронами з різними конструктивними особливостями, при змінних механіко-технологічних властивостях ґрунтового середовища за умови роботи борін в складі комбінованого знаряддя.

**ґрунт, борона, граничний опір ґрунту руйнуванню стисненням, усереднений радіус фракції ґрунту, відстань між слідами зубів борони по напрямку руху, деформація, стиснення**

Проведення диференціації складу комбінованого ґрунтообробного знаряддя для забезпечення раціональних показників його роботи в різних ґрунтово-кліматичних зонах можливе за умов наявності інформації про показники кришення ґрунту не тільки основними робочими органами, а й додатковими, без яких неможливо забезпечити передбачений агро вимогами однорідний, дрібногрудкуватий агрегатний склад по всій глибині обробітку необхідний для сприятливих умов накопичення вологи та поживних речовин. Як доведено раніше при безвідвальному, особливо плоскорізнному, обробітку максимальні розміри гребней формуються саме на поверхні обробленого поля. Тому вирішення задачі ефективного кришення саме цих гребней при мінімальній кількості робочих органів та загальній мінімально допустимій металоємкості комбінованого знаряддя є цілком актуальним. Одним із шляхів вирішення даної задачі може бути підбір раціональних конструктивних технологічних та експлуатаційних параметрів відповідних типів робочих органів за результатами теоретичного аналізу їх функціонування. При цьому важливим показником достовірності результатів є можливість застосування єдиного показника оцінки якості для різних типів робочих органів.

Одним із способів оцінки якості додаткового подрібнення агрегатів поверхневих шарів ґрунту може бути визначення відношення

$$P = S_p / S_o, \quad (1)$$

де  $S_o$  – площа ділянки, яка обробляється;

$S_p$  – площа частини даної ділянки, яка відповідає зоні руйнування земляної фракції. Число  $P$  є не що інше, як ймовірність попадання земляної фракції в зону руйнування – показник якості обробітку ґрунту, іншими словами - відсоток гребней, які будуть зруйновані при контактів з ними робочих органів знаряддя для поверхневого обробітку ґрунту.

Розглянемо дану задачу на прикладі обробки ґрунту звичайними зубовими боронами (з вертикальним розміщенням зубів) та боронами з плоскими зубами та тупим кутом входження їх в ґрунт (рис. 1).

На рис. 2. показана розбивка оброблюваної ділянки на частини (зони) де:

- суцільні жирні лінії  $AA_1$ ,  $GG_1$  –траєкторія руху зубів борони;
- ділянка  $AA_1G_1G$  – оброблювана ділянка між сусідніми борознами;

- ділянки  $AA_1B_1B$ ,  $EE_1G_1G$  – зони, в яких фракції взаємодіють з зубами борони і руйнуються ( $AB = EG$ );

- ділянки  $CC_1B_1B$ ,  $EE_1D_1D$  – зони, в яких фракції взаємодіють з зубами борони, але не руйнуються;

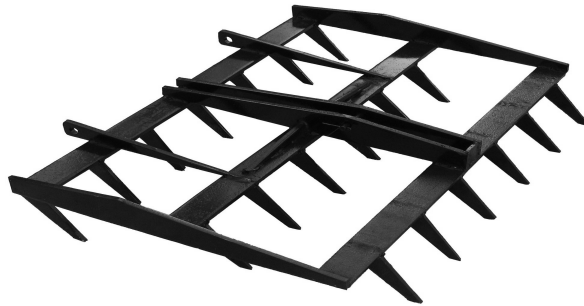


Рисунок 1 – Загальний вигляд борони з плоскими зубами та тупим кутом входження в ґрунт

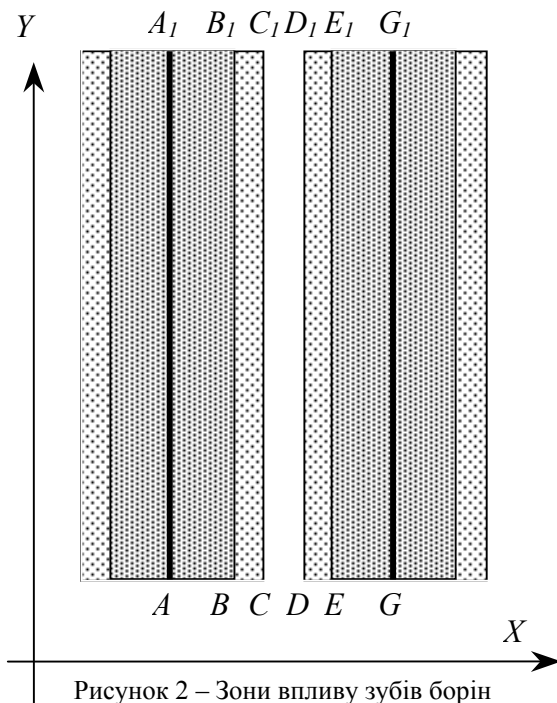


Рисунок 2 – Зони впливу зубів борін на ґрунт в процесі роботи

- ділянка  $CC_1D_1D$  – зона, фракції якої не взаємодіють з зубами борони.

Ширина ділянки  $AG = L$  визначається конструктивними параметрами борони; відстані  $AC$ ,  $DG$  визначається розмірами фракції, яка досліджується (в подальшому  $AC = DG = R$  – усереднений радіус фракції ґрунту).

Отже,

$$P = 2 \cdot AB / L \quad (2)$$

і задача полягає в визначенні розміру  $AB$ .

Нехай фракція (грудка) знаходиться в зоні  $AA_1C_1C$  і  $O_1B = x$  – відстань центра фракції ґрунту від прямої  $AA_1$  (рис. 3, а), де  $O_1$  – центр фракції,  $O_1K = R$  (рис. 3 б));  $K$  – точка контакту зуба борони з фракцією ґрунту;  $\bar{F}_{уд}$  і  $\bar{F}$ , відповідно, сила удару та її складова направлена вздовж

лінії  $KO_1$  (до центра фракції). Визначимо граничне значення змінної  $x$ , при якому відбувається руйнування фракції.

В момент удару грудка знаходиться під дією сил показаних на рис. 3, б):

$\bar{F}_{уд}$  або  $\bar{F}_l$  – сила удару;  $\bar{F}_{оп}$  – сили опору навколишнього середовища (ґрунту);

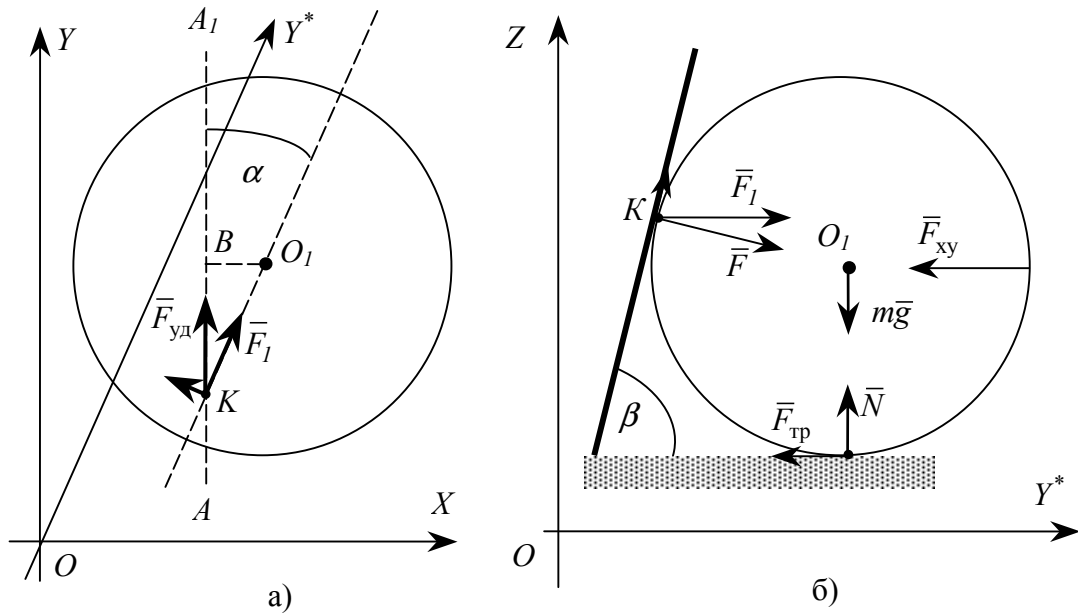
$m\bar{g}$  – сила тяжіння;  $\bar{N}$  – сила реакції нижнього шару ґрунту;  $\bar{F}_{тр}$  – сила тертя

грудки з розміщеними нижче агрегатами ґрунту,

$$\text{де } F_{тр} = Nf,$$

$$F_{ху} = S_{п} \cdot f_{ху},$$

$$m = 4/3 \cdot \pi R^3 \rho \text{ – маса грудки;}$$



а) в горизонтальній площині; б) в вертикальній площині.

Рисунок 3 – Схема взаємодії похилого зуба борони з грудкою в момент удару:

$\rho$  – густина ґрунту,

$f$  – коефіцієнт внутрішнього тертя ґрунту,

$f_{xy}$  – коефіцієнту опору навколишнього середовища,

$S_{\pi} = \pi R^2$  – площа діаметрального перерізу грудки.

Грудка може бути зруйнована в двох випадках:

а) в момент удару, якщо деформація при ударі  $v_{уд}$  перевищить гранично допустиму деформацію  $v_{тр}$ ;

б) після удару, якщо рівнодійна сил опору врівноважить активну силу, тобто зуб борони пройде через фракцію зруйнувавши її.

Спочатку розглянемо випадок борони з вертикальними зубами.

Рівняння руху центра фракції при центральному ударі (пряма руху зуба борони проходить через центр фракції) в проекції на напрям руху (вісь  $OY$ )

запишемо у вигляді:

$$my'' = k(Vt - y) - F_{оп}, \quad (3)$$

де  $V$  – швидкість руху зуба борони;

$t$  – час, який пройшов від початку зіткнення зуба борони з грудкою;

$y$  – переміщення центра ваги грудки;

$F_{оп} = F_{тр} + F_{xy}$ ,  $k$  – коефіцієнт, який характеризує твердість ґрунту.

1.1) очевидно, що  $y = 0$  при  $kVt - F_{оп} \leq 0$  тобто при  $t \in [0, t_l]$ , де  $t_l = F_{оп} / (kV)$ .

Якщо  $Vt_l > Rv$  тобто  $F_{оп} > kRv$ , то грудка руйнується до початку свого руху (борона зминає фракцію).

1.2) при  $t > t_l$  і  $Vt_l < Rv$  грудка почне рухатись і рівняння руху приймає вигляд:

$$y'' + \mu^2 y = \mu^2 Vt - g_l, \quad (4)$$

де  $\mu^2 = k/m$ ,  $g_l = F_{оп} / m$ .

З (4) маємо

$$y(t) = C_1 \cos \mu t + C_2 \sin \mu t + Vt - g_1 / \mu^2,$$

де  $C_1, C_2$  є розв'язками системи рівнянь отриманих з граничних умов  $y(t_1) = 0$ ,  $y'(t_1) = 0$ :

$$\begin{cases} C_1 \cos \mu t_1 + C_2 \sin \mu t_1 + Vt_1 - g_1 / \mu^2 = 0, \\ -C_1 \mu \sin \mu t_1 + C_2 \mu \cos \mu t_1 + V = 0. \end{cases}$$

З останньої системи маємо

$$C_1 = V / \mu \cdot \sin \mu t_1, \quad C_2 = -V / \mu \cdot \cos \mu t_1.$$

Отже,

$$y(t) = -V / \mu \cdot \sin[\mu(t - t_1)] + Vt - g_1 / \mu^2. \quad (5)$$

Максимальна деформація грудки досягається при  $t = t_2$ , де  $t_2$  – момент часу при якому  $y'(t_2) = V$  тобто швидкість руху грудки зрівнюється зі швидкістю руху зуба борони.

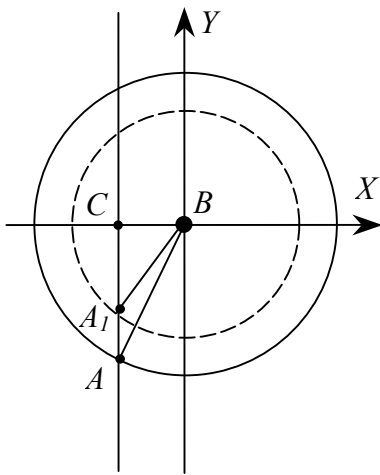


Рисунок 4 – Зміна кута  $\alpha$  в процесі деформації грудки.

З (5) маємо  $t_2 = t_1 + \pi / 2\mu$  і

$$\Delta y_{\max} = Vt_2 - y(t_2) = V / \mu + g_1 / \mu^2.$$

1.3) Умова руйнування  $v_{\text{уд}} = \Delta y_{\max} > v_{\text{кр}} = Rv$

або

$$\sqrt{m/k} \cdot V + F_{\text{оп}} / k > Rv. \quad (6)$$

При нецентральному ударі вираз  $Vt$  в (3) можна наближено прийняти рівним  $Vt \cos \alpha$  і (6) прийме вигляд

$$\sqrt{m/k} \cdot V \cos \alpha + F_{\text{оп}} / k > Rv, \quad (7)$$

де  $\cos \alpha = \sqrt{1 - x^2 / R^2}$ .

Значення  $\cos \alpha$  в процесі деформації грудки є змінним (див. рис. 4). В моменти початку деформації та максимальної деформації воно, відповідно, рівне:

$$\cos \alpha_1 = \cos \angle ABC = \sqrt{1 - x^2 / R^2}$$

та

$$\cos \alpha_2 = \cos \angle A_1 BC = \sqrt{1 - x^2 / [R(I - \nu)]^2}.$$

Наближено в якості  $\cos \alpha$  візьмемо  $\cos \alpha_{\text{сеп}}$  – середнє арифметичне даних значень:

$$\cos \alpha_{\text{сеп}} = 1/2 \cdot \left\{ \sqrt{1 - x^2 / R^2} + \sqrt{1 - x^2 / [R(I - \nu)]^2} \right\}, \quad (8)$$

Підставивши (8) в (7) отримаємо умову для знаходження  $x$  – ширини смуги руйнування грудки бороною з прямими зубами:

$$0,5 \sqrt{m/k} \cdot V \left( \sqrt{1 - x^2 / R^2} + \sqrt{1 - x^2 / [R(I - \nu)]^2} \right) + F_{\text{оп}} / k > Rv. \quad (9)$$

1.4) У випадку борони з похилими зубами зміниться сила опору. При рівномірному русі грудки під дією  $\bar{F}$  (див. рис. 5) маємо:

$$F \sin \beta = Ff \cos \beta + F_{\text{оп}}$$

або

$$F = F_{\text{оп}} / (\sin \beta - f \cos \beta).$$

Отже, сила опору  $F_{\text{оп} \beta} = F \sin \beta$  при русі грудки під дією зубів похилої борони має вигляд

$$F_{\text{оп} \beta} = F_{\text{оп}} / (1 - f \operatorname{ctg} \beta). \quad (10)$$

Якщо  $\operatorname{tg} \beta - f < 0$ , то зуб борони знаходить на грудку і руйнує її.

1.5) Знайдемо координати вектора  $\overline{KO}_I$  (див. рис.2). Нехай центр грудки знаходиться в початку координат декартової системи координат  $OXYZ$ , тоді для координат  $(x, y, z)$  точки  $K$  виконуються умови

$$\begin{cases} x^2 + y^2 + z^2 = R^2, \\ z = y \operatorname{tg} \beta_0 + b, \\ z'_{\text{кол}} = z'_{\text{нр}}, \end{cases}$$

де  $z_{\text{кол}} = \sqrt{R^2 - x^2 - y^2}$ ,  $z_{\text{нр}} = y \operatorname{tg} \beta_0 + b$ .

З останньої системи для

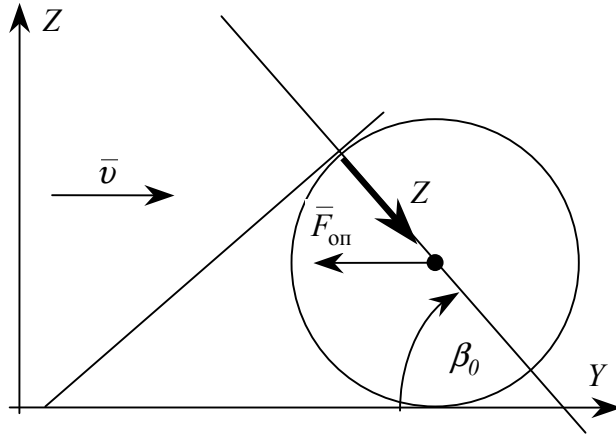


Рисунок 5 – Визначення сили опору при взаємодії грудки з похилим зубом.

довільного фіксованого  $x_K \in [0, R]$  маємо

$$y_K = -\sqrt{R^2 - x^2} \sin \beta_0, \quad z_K = \sqrt{R^2 - x^2} \cos \beta_0.$$

Отже, вектор  $\overline{KO}_I$  має напрям  $\vec{a}_{\overline{KO}_I} (\sin \alpha, \cos \alpha \sin \beta_0, -\cos \alpha \cos \beta_0)$ , і кут  $\beta$  на рис. 3 б) задається співвідношенням

$$\beta = \arccos(\cos \alpha \cos \beta_0). \quad (11)$$

1.6) Очевидно, що в процесі деформації кут  $\beta$  є змінним і в моменти початку деформації та максимальної деформації він, відповідно, рівний:

$$\cos \beta_1 = \sqrt{1 - x^2 / R^2} \cos \beta_0 \quad \text{та} \quad \cos \beta_2 = \sqrt{1 - x^2 / [R(1 - \nu)]^2} \cos \beta_0.$$

При цьому

$$\begin{aligned} \cos \alpha_1 &= \sqrt{1 - \left( \frac{x}{R \sin \beta} \right)^2} = \frac{\sqrt{R^2 - x^2} \sin \beta_0}{\sqrt{R^2 \sin^2 \beta_0 + x^2 \cos^2 \beta_0}} \\ \cos \alpha_2 &= \sqrt{1 - \left( \frac{x}{R(1 - \nu) \sin \beta_2} \right)^2} = \frac{\sqrt{R^2 (1 - \nu)^2 - x^2} \sin \beta_0}{\sqrt{R^2 (1 - \nu)^2 \sin^2 \beta_0 + x^2 \cos^2 \beta_0}} \end{aligned}$$

і

$$\cos \alpha_{\text{cep}} = \frac{\sin \beta_0}{2} \left( \frac{\sqrt{R^2 - x^2}}{\sqrt{R^2 \sin^2 \beta_0 + x^2 \cos^2 \beta_0}} + \frac{\sqrt{R^2 (1 - \nu)^2 - x^2}}{\sqrt{R^2 (1 - \nu)^2 \sin^2 \beta_0 + x^2 \cos^2 \beta_0}} \right)$$

або

$$\cos \alpha_{\text{cep}} = \frac{\sin \beta_0}{2} \left( \left( \frac{R^2}{R^2 - x^2} - \cos^2 \beta_0 \right)^{\frac{1}{2}} + \left( \frac{(1 - \nu)^2 R^2}{(1 - \nu)^2 R^2 - x^2} - \cos^2 \beta_0 \right)^{\frac{1}{2}} \right).$$

Враховуючи, що для борони з похилими зубами швидкість наближення зуба до центра фракції визначається рівністю

$$V = V \sin \beta_0 \quad (12)$$

умову руйнування фракції можна записати наступним чином

$$V \sqrt{k m} \cos \alpha_{cep} \sin \beta_0 + \frac{F_{тр} + F_{оп}}{1 - f \operatorname{ctg} \beta} > k R v, \quad (13)$$

$$\text{де } \beta = \arccos(\cos \alpha_{cep} \cos \beta_0).$$

Отже,

$$P = \frac{2R}{L} \frac{\sqrt{R^2 - x^2}}{\sqrt{R^2 + x^2 \operatorname{ctg}^2 \beta_0}}, \quad (14)$$

де  $x$  визначається з рівняння

$$V \sqrt{k m} \cos \alpha_{cep} \sin \beta_0 + \frac{1}{3} \frac{(0.03 \pi R^2 \sigma_0 + 4 f \pi R^3 g \rho_0) \left(1 - \frac{2\sigma - \sigma_0}{30\sigma_0}\right)}{1 - \frac{f}{\sqrt{\cos^{-2} \alpha_{cep} \cos^{-2} \beta_0} - 1}} - k R v = 0,$$

в якому

$$\cos \alpha_{cep} = \frac{\sin \beta_0}{2} \left[ \left( \frac{R^2}{R^2 - x^2} - \cos^2 \beta_0 \right)^{\frac{1}{2}} + \left( \frac{(1-v)^2 R^2}{(1-v)^2 R^2 - x^2} - \cos^2 \beta_0 \right)^{\frac{1}{2}} \right],$$

$$k = 1.3 \cdot 10^{-3} \frac{\sigma}{R \cdot v}, \quad v = v(\sigma).$$

Значення  $s$  та  $v$ , а також співвідношення між ними були визначені попередньо і представлені в [1, 2].

Розглянуті гіпотези руйнування грудок будуть справедливі тільки за умови достатньої маси борони.

Масу борони  $M$  потрібно вибрати такою, щоб борона руйнувала усі грудки з якими зустрічаються її зуби. Розглянемо самий „несприятливий” випадок: усі  $n$  зубів мають одночасне центральне зіткнення з фракціями і останні не руйнуються в наслідок деформації та не вислизують з під зубів. Тобто одиниця ваги борони  $M/n$  (вага борони, яка припадає на одну грудку) повинна бути більшою за силу, яка здійснює гранично допустиму деформацію  $v_{гр}$  грудки.

Отже, маємо

$$Mg/n > k R v_{гр} \quad \text{або} \quad M \geq n v_{гр} k R / g. \quad (15)$$

Скориставшись програмним забезпеченням «Matcad» і провівши моделювання процесу взаємодії зубів різних типів з агрегатами ґрунту різними за розмірами, технологічними властивостями та при різних конструктивних і експлуатаційних показниках отримуємо графічне зображення залежності якісного показника кришення ґрунту боронами з різними типами зубів (Рис. 6,7) від ряду факторів.

За результатами попереднього літературного аналізу та обмежених експериментальних досліджень найбільш впливовими факторами були прийняті:

- граничний опір ґрунту руйнуванню стисненням ( $s$ );
- усереднений радіус фракції ґрунту ( $R$ );
- відстань між слідами зубів борони по напрямку руху ( $L$ );
- робоча швидкість агрегату ( $v$ );
- кут нахилу зубів борони від вертикального положення ( $\beta$ ).

Як передбачалося раніше, руйнування агрегатів ґрунту на поверхні поля бороною з прямими зубами відбувається в результаті удару і подальшого тиску з боку зубів на грудки в вертикальній площині, а при роботі борони з похилими зубами в результаті удару та стискання грудок як в вертикальному так і горизонтальному напрямку. За таких умов по вагомості впливу на ймовірність руйнування грудок, на перший план виходить граничний опір ґрунту руйнуванню стисненням  $s$ . Так, при роботі звичайної зубової борони, при решті рівних вихідних умов, руйнування грудок можливе тільки в діапазоні зміни  $s$  від 0 до  $4 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>, що може мати місце при обробітку піщаних, супіщаних, легко та середньо суглинкових ґрунтів.

Борони ж з похилими зубами, за умови достатньої їх маси, здатні забезпечувати відповідну ймовірність руйнування грудок по всій величині можливого діапазону зміни  $s$  від 0 до  $21,5 \cdot 10^5$  н/м<sup>2</sup>. Що свідчить про можливість використання даних борін на самих важких ґрунтах, за характеристикою по механічному складу – до важкої глини.

Так як величина кінетичної енергії, яка передається до грудки і від якої в значній мірі залежить ймовірність руйнування останньої знаходиться в тісному зв'язку зі швидкістю переміщення робочого органу в ґрунті, то для грудок з різним значенням граничного опору руйнуванню є відповідне мінімальне значення швидкості при якому руйнування відбувається в результаті сили удару (на рис.6, це  $u = 2,1$  м/с), а до даного значення руйнування відбувається за рахунок стиснення. Така закономірність характерна для борони з прямими зубами, для якої руйнування грудок в більшості випадків відбувається за рахунок удару.

Для борони з похилими зубами руйнування грудок, а отже і значення якісного показника, в меншій мірі залежить від робочої швидкості (рис. 7), так як переважаючим фактором руйнування грудок в даному випадку є їх стиснення, як у вертикальній так і в горизонтальній площині.

Основним конструктивним впливовим фактором для обох типів борін в даному випадку є відстань  $L$  між слідами зубів по напрямку руху.

Є очевидним, що зі збільшенням даної відстані ймовірність руйнування грудок знижується. Характер залежності  $P$  від  $L$  для різних типів борін схожий, але фактичне значення  $P$  для борони з похилими зубами на 15÷20% більше.

Другим конструктивним параметром, але характерним тільки для борони з похилими зубами, є кут  $\beta$  нахилу зубів відносно вертикального положення.

Крива, яка характеризує залежність  $P$  від  $\beta$  (рис. 7), має екстремум, що припадає на значення кута  $\beta \approx 40 \div 45^\circ$ . Максимально можливе підвищення значення якісного показника  $P$  за рахунок зміни кута  $\beta$  становить близько 15%.

Очевидною, і цілком пояснюваною, також є залежність ймовірності руйнування ґрунту від усередненого радіусу фракції ґрунту (грудки). Мається на увазі максимальний радіус грудок який повинен залишатися на поверхні поля після обробітку. Згідно з агротехнічними вимогами  $R = 25$  мм. Згідно з рис. 6,7 при такому значенні  $R$  звичайна борона забезпечить значення якісного показника близьке до 0,55, а для борони з похилими зубами понад 0,70.

Проведений аналіз дозволяє зробити загальний висновок про те, що борона з похилими зубами є більш ефективна і адаптована до роботи в різних ґрунтових умовах і на різних експлуатаційних режимах при аналогічних конструктивних параметрах та агротехнічних вимогах.

Найбільш прийнятним і ефективним шляхом підвищення якості виконання технологічного процесу бороною з похилими зубами може бути зменшення відстані  $L$  між слідами зубів по напрямку руху борони та врахування оптимального значення кута  $\beta$  нахилу зубів відносно вертикального положення.

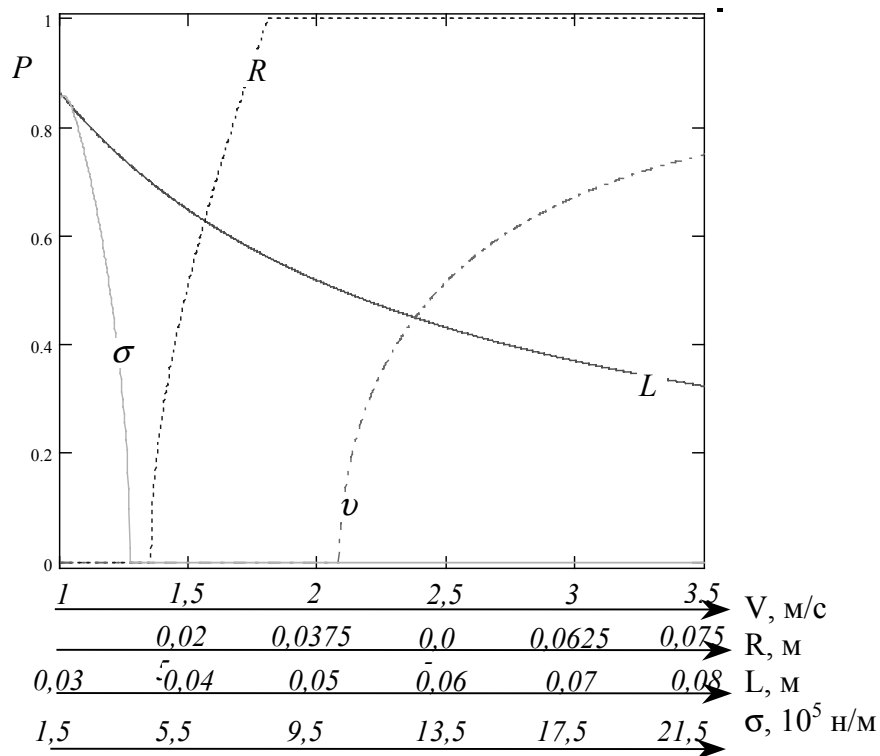


Рисунок 6 – Графічне зображення залежності якісного показника  $P$  обробітку ґрунту бороною з прямими зубами від:

- граничного опору ґрунту руйнуванню стисненням ( $\sigma$ ,  $10^5$  н/м<sup>2</sup>);
- усередненого радіусу фракції ґрунту  $R$ , м;
- відстані між слідами зубів бороны по напрямку руху  $L$ , м;
- робочої швидкості агрегату  $v$ , м/с.

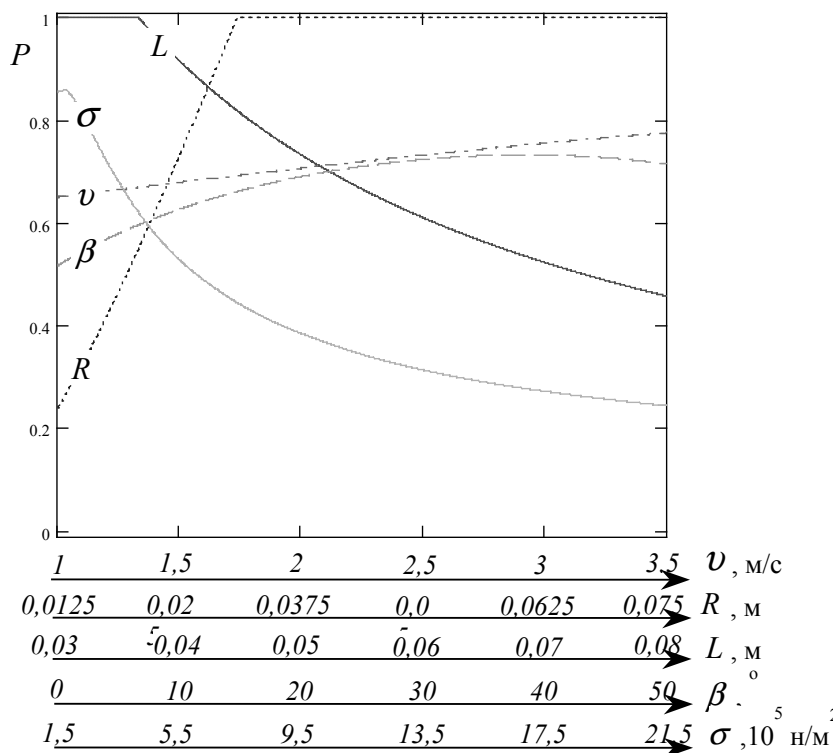


Рисунок 7 – Графічне зображення залежності якісного показника  $P$  обробітку ґрунту бороною з плоскими похилими зубами від:



- граничного опору ґрунту руйнуванню стисненням ( $\sigma$ ,  $10^5 \text{ н/м}^2$ );
  - усередненого радіусу фракції ґрунту  $R$ , м;
  - відстані між слідами зубів борони по напрямку руху  $L$ , м;
  - робочої швидкості агрегату  $v$ , м/с;
  - кута нахилу зубів борони відносно вертикального положення  $\beta^0$ .
- (залежності  $P$  від  $v$ ,  $R$ ,  $L$ ,  $s$  отримані при  $\beta = 50^0$ ).

## Список літератури

1. 1.Сало В.М. Експериментальне визначення залежності твердості різних за механічним складом ґрунтів від їх фізико-механічних властивостей./ праці Таврійської державної агротехнічної академії. Випуск 1. Том 22..., Мелітополь, 2001., С. 56-61.
2. 2.Сало В.М. Визначення залежності пластичних деформацій ґрунтів від фізико-механічних властивостей./ Збірник наукових праць „Конструювання, виробництва, та експлуатації сільськогосподарських машин”. Випуск 30., Кіровоград, КДТУ, 2001.,с. 43.

В работе представлены содержание и результаты теоретического анализа эффективности процесса дополнительной поверхностной обработки почвы зубовыми боронами с разными конструктивными особенностями, при изменяемых механико-технологических свойствах почвенной среды при условии работы борон в составе комбинированного орудия.

This work dealt with the context and results of the theoretical analyze of the supplementary ground shadowing by toothed harrows with different constructive features, mechanical and technological ground surrounding features of the fixed combined equipment operation.